

Условия зажигания самопульсирующего разряда с микрополым катодом в воздухе при атмосферном давлении

С. И. Мошкунов, К. И. Романов, В. Ю. Хомич, Е. А. Шершунова

Экспериментально исследованы электрические характеристики разряда с микрополым катодом в воздухе при атмосферном давлении. Установлено, что разряд с микрополым катодом развивается в самопульсирующем режиме при среднем потребляемом токе сотни микроампер – единицы миллиампер. На основании экспериментальных данных сделан вывод о том, что частота самопульсации линейно зависит от потребляемого тока. Получены данные о напряжении зажигания самопульсирующего разряда с микрополым катодом при различных диаметрах отверстия в катоде 200–500 мкм.

Ключевые слова: разряд с микрополым катодом, атмосферный воздух, диаметр отверстия в катоде, режим самопульсации, напряжение зажигания разряда, частота импульсов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-11-15

Введение

Разряды с микрополым катодом – это разряды в газе между катодом с микроотверстием и анодом, разделенными слоем диэлектрика [1]. Первое упоминание об исследовании разряда с микрополым катодом встречается более 20 лет назад в работе Шёнбаха [2]. Наряду с барьерным разрядом разряды с микрополым катодом могут быть реализованы при атмосферном давлении. Малые размеры, малая потребляемая мощность, низкое напряжение зажигания делает привлекательным использование неравновесной плазмы разряда с микрополым катодом в ряде приложений,

например, таких как обработка поверхности, ее деконтаминация, нанесение тонких пленок и т. д. [2, 3]. Быстрый рост применения микроплазмы, с точки зрения разнообразия и широты приложений [4, 5], требует детального изучения процесса разряда.

Под таким разрядом понимают разряд в газовой области микронных размеров, где анод и катод разделены диэлектриком толщиной десятки – сотни микрон. Причем обязательным условием существования таких разрядов является наличие микроотверстия в катоде и диэлектрике. Благодаря малым микронным размерам в промежутке наблюдается эффект Пенделя [6], т. е. колебательное движение электронов вблизи катода, приводящее к сильной ионизации промежутка, что способствует развитию разряда и его физическому выходу из разрядного промежутка наружу. Дополнительная прокачка разрядного промежутка позволяет как охлаждать электроды, так и получать на выходе неравновесную холодную воздушную плазменную струю длиной до 1 см. Однако такая струя может быть сильно подвержена как параметрам электропитания, так и сильно зависеть от геометрии реактора.

Согласно закону подобия Элиса-Уайта (Allis-White similarity law) [7], диапазон рабо-

Мошкунов Сергей Игоревич, зам. директора по науке, д.т.н., член-корр. РАН.

Романов Кирилл Ильич, инженер.

Хомич Владислав Юрьевич, научный руководитель, д.ф.-м.н., академик РАН.

Шершунова Екатерина Александровна, зав. лаб., к.т.н.

E-mail: eshershunova@ieeras.ru

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

Статья поступила в редакцию 08 августа 2021 г.

© Мошкунов С. И., Романов К. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А., 2021

чих давлений разряда с микрополым катодом находится в обратной зависимости с диаметром отверстия. Таким образом, при атмосферном давлении разряд существует при диаметре отверстия в катоде на уровне в сотни микрон [8]. Однако не исследовано подробно, как влияет этот размер на характеристики разряда: напряжение зажигания, режим горения, частоту следования импульсов.

В рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование влияния параметров электропитания, размера полости в катоде и дополнительной емкости на режим горения разряда.

Экспериментальная установка

Для проведения исследования были изготовлены реакторы, представляющие из себя двусторонние платы в виде «сэндвичей» на основании из керамического ламината толщиной 200 мкм с толщиной фольги 18 мкм. Исследования проводились при различном диаметре сквозных отверстий, а именно, 200, 300, 400 и 500 мкм. На катод была напаяна медная трубка, которая одновременно служила и теплоотводом, и конструкционным элементом для прокачки газа. Сквозь реактор прокачивался воздух со скоростью около 1 л/мин.

Схематично экспериментальная установка показана на рис. 1. Постоянное напряжение на разрядном промежутке (РП) форми-

ровалось благодаря разработанному нами импульсному источнику постоянного напряжения, питающемуся от сети переменного тока (220 В, 50 Гц). Принцип работы такого источника детально описан в [9–11]. Переменное напряжение сети преобразуется в постоянное с помощью диодного моста (ДМ). Это напряжение идет на полумостовой инвертор, образованный двумя полупроводниковыми ключами S1 и S2. По сигналу с ШИМ-контроллера (СУ1 и СУ2) открываются полевые транзисторы инвертора S1 и S2. С инвертора напряжение идет на вход умножителя напряжения. В результате на выходе формируется постоянное высокое напряжение, которое прикладывается к электродам РП. Его значение может регулироваться при изменении уровня опорного значения контроллера V_{ref} . Это значение и значение сигнала обратной связи, полученного после деления высокого напряжения V_{fb} , обеспечивают работу ШИМ-контроллера.

Ток разряда ограничивался балластным сопротивлением R_b до значения 1 мА. Напряжение на РП V_{dg} измерялось с помощью высоковольтного пробника Tektronix P6015A емкостью 3 пФ, ток определялся через падение напряжения V_s на резистивном датчике R_s , включенном последовательно с РП. Данные о напряжении на промежутке и токе разряда выводились на экран осциллографа LeCroy WaveSurfer 422 и записывались в цифровом виде для дальнейшей обработки.

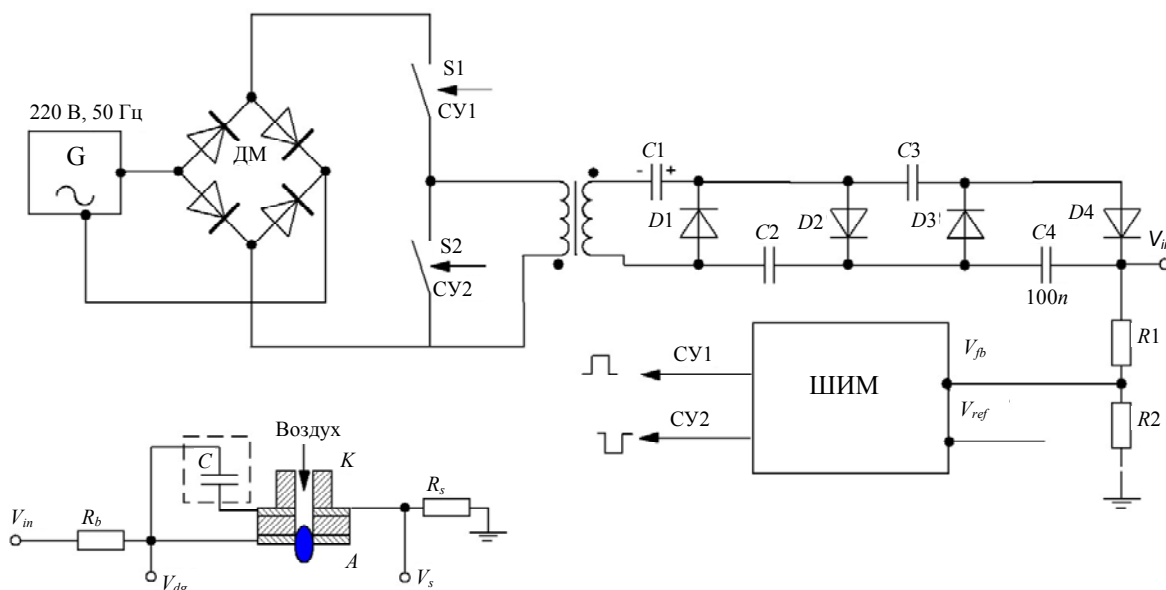


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Результаты

На рис. 2, а представлены типичные осциллограммы напряжения и тока разряда с микрополым катодом в воздухе атмосферного давления при диаметре отверстия в катоде 200 мкм. Как видно из осциллограмм разряда, он развивается в импульсном режиме с килогерцовой частотой. Напряжение зажигания разряда в этом случае составляет около 1600 В, а пиковый ток достигает сотен миллиампер при потребляемом токе 0,8 мА. Длительность импульса тока разряда по основанию составляет десятки наносекунд (см. рис. 2, б).

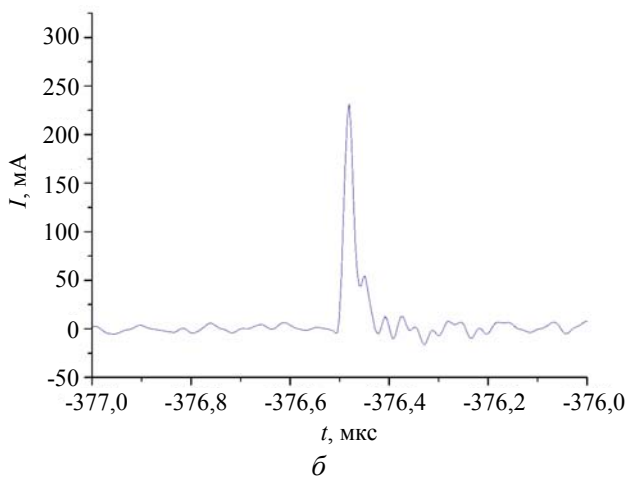
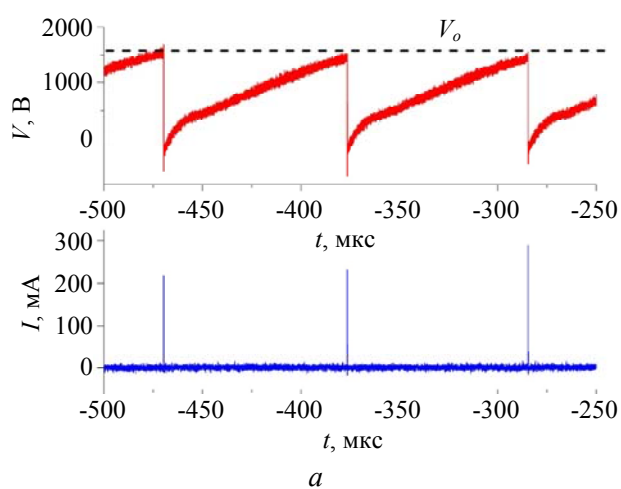


Рис. 2. Временные характеристики разряда: а – осциллограммы напряжения и тока разряда при диаметре отверстия в катоде 200 мкм и потребляемом токе 0,8 мА (V_0 – напряжение зажигания разряда); б – импульс разрядного тока.

На основании осциллограмм напряжения и тока разряда были построены зависимости частоты самопульсации f от среднего тока разряда I_{av} при разных диаметрах отверстий в

катоде в диапазоне 200–500 мкм. Результаты представлены на рис. 3, из которого видно, что частота пульсаций практически не зависит от диаметра полости катода. Однако хорошо заметно, что частота пульсации f линейно увеличивается с ростом среднего тока разряда I_{av} .

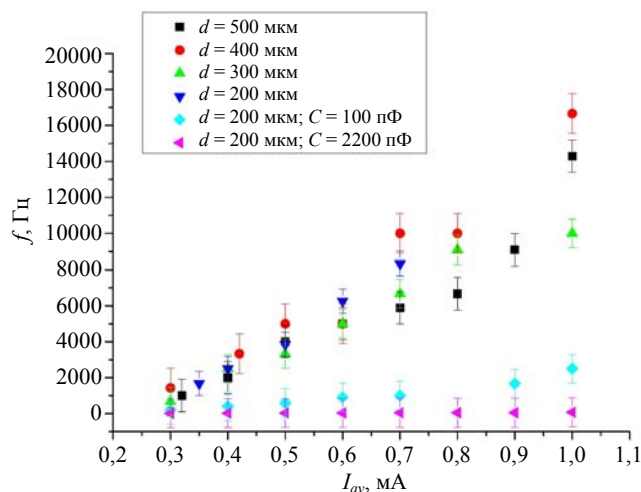


Рис. 3. Зависимость частоты самопульсации тока разряда от величины среднего тока разряда для разных диаметров отверстий в катоде $d = 200–500$ мкм, а также при включенном в параллель с РП добавочным конденсатором C .

Поскольку, по сути, разрядная ячейка представляет собой конденсатор, имеем соотношение:

$$I = C \frac{\Delta U}{\Delta t} \tag{1}$$

где ΔU – падение напряжения на разрядном промежутке, которое можно оценить из осциллограммы напряжения; I – среднее значение тока разряда; Δt – период колебаний напряжения, который, следовательно, находится в обратной зависимости от частоты повторения. Тогда получим зависимость:

$$f = \frac{I}{C \Delta U}. \tag{2}$$

Исходя из формулы (2), можем найти емкость разрядного промежутка:

$$C = \frac{I}{\Delta U f}. \tag{3}$$

На основании экспериментальных данных видно, что емкость разрядного промежутка

ка вне зависимости от диаметра отверстия получается равной 60 ± 5 пФ. Это значение включает в себя как эквивалентную емкость разрядного промежутка, так и паразитную емкость установки.

Изменением величины дополнительной емкости C , включенной параллельно разрядному промежутку, мы можем варьировать частоту импульсов f . На рис. 3 видны изменения частоты f в зависимости от разных отличающихся по порядку значений емкости C . Как видно, увеличение емкости приводит к более редким разрядным событиям.

Была проведена также оценка напряжения зажигания в зависимости от потребляемого тока для реакторов с различными диаметрами отверстий в катоде. Экспериментально получено, что вне зависимости от диаметра отверстия в диапазоне 200–500 мкм и значений потребляемого тока в пределах 0,1–1 мА напряжение зажигания V_0 оставалось практически постоянным и равнялось 1650 ± 150 В.

Заключение

Таким образом, проведены исследования разряда с микрополым катодом при потребляемом токе до 1 мА. Установлено, что в этих условиях разряд горит в режиме самопульсации. Диаметр отверстия в катоде в пределах 200–500 мкм не влияет на изменение напряжения зажигания или частоту разряда. Частота

самопульсации линейно возрастает с ростом среднего тока разряда, при этом она может варьироваться включением добавочного конденсатора в параллель разрядному промежутку.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-08-00069.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schoenbach K. H. et al. // Physics of plasmas. 2000. Vol. 7. № 5. P. 2186.
2. Schoenbach K. H. et al. // Plasma Sources Science and Technology. 1997. Vol. 6. № 4. P. 468.
3. Witvrouwen T., Paulussen S., Sels B. // Plasma Processes and Polymers. 2012. Vol. 9. № 8. P. 750.
4. Becker K. H., Schoenbach K. H., Eden J. G. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Vol. 39. № 3. P. R55.
5. Miclea M. et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38. № 11. P. 1709.
6. Helm H. // Zeitschrift für Naturforschung A. 1972. Vol. 27. № 12. P. 1812.
7. Gomes M. P., Sismanoglu B. N., Amorim J. // Brazilian Journal of Physics. 2009. Vol. 39. P. 25.
8. Stark R. H., Schoenbach K. H. // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 74. № 25. P. 3770.
9. Мошкунев С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 2. С. 104.
10. Мошкунев С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 3. С. 34.
11. Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. Генераторы высоковольтных импульсов на основе составных твердотельных коммутаторов. – М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2018.

PACS: 52.80.–s

Ignition conditions for a self-pulsing discharge with the microhollow cathode in air

S. I. Moshkunov, K. I. Romanov, V. Yu. Khomich, and E. A. Shershunova

Institute for Electrophysics and Electric Power RAS
18 Dvortsovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: eshershunova@ieeras.ru

Received August 08, 2021

This work is devoted to the study of the electrical characteristics of a discharge with a microhollow cathode in air at atmospheric pressure. It was experimentally found that the discharge with a microhollow cathode developed in a self-pulsing mode with an average current of hundreds of microamperes. According to the experimental data it was concluded that the self-

pulsing frequency linearly depended on the consumed current. The values of the ignition voltage of the self-pulsing discharge with a microhollow cathode at different hole diameters were obtained.

Keywords: microhollow cathode discharge, atmospheric air, cathode hole diameter, self-pulsing mode, pulse frequency.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-11-15

REFERENCES

1. K. H. Schoenbach et al., *Physics of plasmas* **7** (5), 2186 (2000).
2. K. H. Schoenbach et al., *Plasma Sources Science and Technology* **6** (4), 468 (1997).
3. T. Witvrouwen, S. Paulussen, and B. Sels, *Plasma Processes and Polymers* **9** (8), 750 (2012).
4. K. H. Becker, K. H. Schoenbach, and J. G. Eden, *J. Appl. Phys.* **39** (3), 55 (2006).
5. M. Miclea et al., *J. Appl. Phys.* **38** (11), 1709 (2005).
6. H. Helm, *Zeitschrift für Naturforschung A* **27** (12), 1812 (1972).
7. M. P. Gomes, B. N. Sismanoglu, and J. Amorim, *Brazilian Journal of Physics* **39**, 25 (2009).
8. R. H. Stark and K. H. Schoenbach, *Applied Physics Letters* **74** (25), 3770 (1999).
9. S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, and E. A. Shershunova, *Technical Physics Letters* **44** (1), 84 (2018).
10. S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, and E. A. Shershunova, *Technical Physics Letters* **45** (2), 93 (2019).
11. S. I. Moshkunov and V. Yu. Khomich, *High-voltage pulse generators based on solid-state switches* (Fizmatlit, Moscow, 2018) [in Russian].